

软土电化学桩加固室内模型试验研究

余 飞¹, 王小刚², 陈善雄¹, 程昌炳¹

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所, 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071;

2. 广西桂和高速公路有限公司, 广西 来宾 545900)

摘要: 利用自行研制的一套软土电化学成桩加固的室内模型试验装置, 开展系统的模型试验, 成功再现铁质胶结成桩加固的整个物理化学过程, 弄清胶结桩体组成结构特征, 并通过加固土体电流、电阻、盐度的跟踪监测, 探讨电化学成桩加固的电解特性及主要控制参数。在此基础上, 开展微型贯入试验、室内平板载荷试验、崩解试验, 对胶结桩体强度分布规律、承载力特性和水稳性进行研究。研究结果表明, 电化学胶结桩范围为电极直径的 8~12 倍, 强度随与电极距离的增大而逐渐减小, 胶结核心层和影响层组成之间存在一明显的强度突变面, 胶结桩-土复合地基的承载力和变形模量较加固前提高约 10 倍, 并具有很好的水稳性。

关键词: 土力学; 电化学桩; 软土加固; 模型试验; 胶结物

中图分类号: TU 43

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2013)增 1-2716-07

LABORATORY MODEL TEST STUDY OF ELECTROCHEMICAL STABILIZATION IN SOFT SOIL

YU Fei¹, WANG Xiaogang², CHEN Shanxiong¹, CHENG Changbing¹

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 2. Guangxi Guihe Expressway Company Limited, Laibin, Guangxi 545900, China)

Abstract: A set of laboratory model test equipment for electrochemical reinforcement of soft soil is designed to carry out a chain of model tests, the whole physical and chemical processes of ferruginous cemented piles are reconstructed, and structural features of cement piles are clarified. The electrochemical characteristics and the main control parameters of the electrolytic reinforcement in the pile are discussed through tracking and monitoring of current, resistance and salinity of the reinforced soil. On this base, the research on the strengthen distribution law, load capacity property and water stability is made through the micro-penetration test, indoor plate loading test and disintegration test. The results show that, the ranges of ferruginous cemented piles are respectively 8 times and 12 times thickness of electrode diameter. The strength of cemented soil is inversely proportional to the diameter distance of electrode. There is strong discontinuous surface between the coral layer and the affected layer. The cemented ground load force and the deformation modulus are 10 times better than the former, and it has good water stability.

Key words: soil mechanics; electrochemical stabilization; reinforcement of soft soil; model test; cement compounds

1 引 言

土体中所含有的胶结成分, 使其工程力学性质

明显改善。软土电化学成桩加固法正是基于上述认识而提出的一种加固方法, 即人为地在软土中插入金属电极, 并施以直流电, 电极在直流电的作用下发生一系列反应后形成胶结桩体, 以达到加固软土

收稿日期: 2012-04-17; **修回日期:** 2012-05-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50609028)

作者简介: 余 飞(1978-), 男, 2004 年于华中科技大学结构工程专业获博士学位, 现任副研究员, 主要从事灾害土工程特性及其处置方法方面的研究工作。E-mail: yufei8720@163.com

的目的。该方法不需要添加水泥、砂等建筑材料，不需要大型施工机械，无粉尘、噪音污染，且对加固区域环境无扰动，是一种无污染的环保型地基处理方法，具有广阔的应用前景^[1-2]。

早在 1806 年前苏联学者列斯首先发现了电动现象，其后君克、海姆荷次、波林、卡萨格澜和蔡氏亚等先后在电渗理论方面做了很多研究，并将其应用于实际工程处理，取得了良好的效果^[3]。前苏联 M. Y. Trushinskii 在电化学加固方面做了大量研究，在对戈尔斯克的亚黏土地区进行现场加固试验时，发现通电加固以后，电极周围形成了 100~200 mm 的高强度胶结桩。曾国熙和高有潮^[4]就软土电化学加固进行初步试验研究，对比分析了试验前、后土体基本物理力学指标的变化。余 飞等^[2]在萧山跨湖桥独木舟遗址区(软土地区)进行了电化学加固试验，经过处理后土的承载力明显提高，取得了较好的效果。J. Q. Shang 等^[5]研究了电化学加固法在澳大利亚西海岸石灰性土中的加固效果，试验后土的不排水强度和有效黏聚力提高了整整 7 倍。

为提高电化学成桩的效果，L. G. Dzhaniani 等^[6-8]建议通过注入化学添加剂的方法来提高电化学处理的效果，如在电极的正负极注入盐浆，来减小电阻。J. Q. Shang 等^[5]通过对比多种化学添加剂以后，发现采用 10% 的 CaCl₂ 溶液能够取得较好的加固效果。

但到目前为止，该方法都没有被大范围的推广使用，主要原因在于对胶结桩形成机制、结构特征、力学特性以及加固工艺控制参数缺乏系统的研究，其加固的有效性、持续性尚需要试验论证。因此，本文根据电化学成桩加固的基本原理，研制了一套软土人工铁质胶结成桩加固的室内模型试验装置，通过模型试验来研究成桩过程电解特性、桩体结构特征、加固体强度分布规律及承载力特性，对进一步揭示其胶结本质、探索合理的加固施工工艺，具有现实的指导意义。

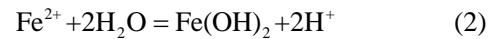
2 电化学铁质胶结成桩机制

天然铁质胶结土即使在含水率和孔隙比较高时，仍具有较好的承载力和抗压缩性。人工电化学铁质胶结成桩是通过电解插入土体中的铁质电极，人为创造水化、氧化和络合反应的环境条件，并改变离子迁移的速率和方向，以快速形成稳定的胶结土体，其化学反应总体上可描述为以下几个过程。

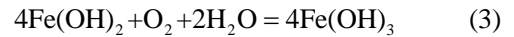
首先，金属铁电解为 Fe²⁺ 离子，即



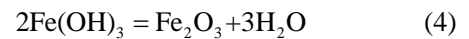
金属 Fe²⁺ 水化为 Fe(OH)₂，即



金属 Fe²⁺ 在氧气和水的作用下被氧化为高价氢氧化物，即



高价 Fe(OH)₃ 脱水变成胶结物，即



最终形成了 αFe(OH)₂·βFe(OH)₃·χFe₂O₃ 的胶结混合物。

土体电化学胶结过程是一个动态反应过程，受外加电势和离子浓度势控制，一方面，土中金属离子在电势场作用下向电极方向迁移汇集，另一方面，电极电解形成大量金属离子，导致电极处的离子浓度增加，压缩了扁平状粘土矿物颗粒的表面双电层，增加了颗粒间吸引力。在电场势和离子浓度势的双重作用下，土体溶液中离子快速地向电极迁移，在电极周围发生上述化学反应后，形成大量氧化物，氧化物不断沉积形成含水凝胶，使得土体原始絮凝结构变得更为稳定。在定向直流电作用下形成的胶结颗粒排列具有明显方向性，随电化学反应的进行，含水凝胶进一步脱水老化，从而使电极周围土体强度进一步提高，形成稳定的胶结桩体^[9]。

3 室内模型试验装置与试验方法

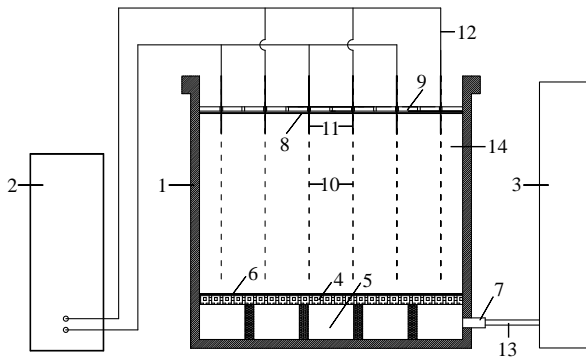
软土电化学成桩加固实际包括 2 种效应：一方面水分子在电流作用下发生定向移动，出现电渗排水固结效应；另一方面金属电极本身被电解，电解形成的金属阳离子与土中的水、氧气发生水化、氧化、脱水反映后形成络合胶结物，并聚集在电极周围，形成强度较高的胶结桩体。这 2 个过程是同时发生不可分离的，但其起始促发条件存在较大的差异，电渗排水在较小的电流强度下(一般为 100 mA)效果已相当显著，而电化学成桩效应需要较高的电流强度(一般为 20~100 A)，且仅在正电极周围形成胶结桩体。

为了通过模型试验来研究电化学成桩过程及胶结特性，模型试验装置必须能模拟现场地质环境条件下，软土电化学加固的整个物理过程，而且要尽

量减小电渗排水对土体参数变化带来的影响，以突出电化学成桩效应对地基承载力的贡献。

3.1 室内模型试验装置的研制

基于上述分析，研制了一套软土电化学成桩加固室内模型试验装置(见图 1)，它包括土样箱、可调式稳压稳流直流电源、铁质电极、电缆线、电极插孔板、水箱、多孔透水板、热缩管、土工布、塑料薄膜等。



1—土样箱；2—可调式稳压直流电源；3—水箱；4—多孔透水板；5—水槽；6—土工布；7—水阀；8—塑料薄膜；9—电极插孔板；10—铁质电极；11—热缩管包裹的铁质电极；12—电缆线；13—塑料水管；14—软土样

图 1 试验装置

Fig.1 Experimental device

土样箱采用工程塑料制作，尺寸为 600 mm×600 mm×600 mm 的方箱，在土样箱距离底部约 100 mm 处水平设置一块多孔透水板，在多孔透水板下面，土样箱两相对的侧壁分别设有水阀和排气阀，水阀通过水管与稳压供水箱相连，以提供稳定地下水。

可调式稳压稳流直流电源具有恒定电流输出、恒定电压输出和正负极定时自动倒向功能，输入电压为 380 V，输出电流(直流)为 0~300 A，输出电压为 0~150 V，连续可调，自动正负极倒向时间间隔为 0~99 min。

电极采用 $\phi 3.5$ mm 的铁丝，间距为 100 mm，长度为 650 mm，分为绝缘段和导电段，从电极露头端至土体表面以下 50 mm 为绝缘段，采用热缩管包裹，以避免土-水-气交界面处电极容易快速腐蚀断裂的问题。

电极插孔板尺寸为 600 mm×600 mm×20 mm 的工程塑料板，并按 50 mm 的间距布置直径为 10 mm 的电极插孔。

该模型试验装置通过外接水箱可实时调节地下水位；通过电极插孔板和塑料薄膜封闭土样上表面，减小表面蒸发效应；通过专用稳压直流电源，提供

较大的输入电流，同时可实时控制电流、电压大小和正负极导向时间，保证正负电极处均能形成胶结桩；在表面封闭且联通地下水的土样中，正负极定时倒向可反复改变水分子运移的方向，尽量避免水分的散失，减小电渗排水效应。

3.2 室内模型试验方法及步骤

(1) 土样制备与调制

采集淤泥质软土样，进行翻晒、破碎，并过 5 mm 的筛，制成风干土样备用。本次试验所用的软土取自湖北武汉武清四干道公路路基基底，为淤泥质黏土，含有丰富的有机物，深褐色，呈流塑状态，天然含水率 40% 左右。

将土工布平铺于土样箱内的多孔透水板之上，打开水阀，往土样箱底部的水槽中灌水，直至液面达到土工布顶面，关闭水阀。按配置含水量 60% 称取风干土样和水放入电动搅拌器中，搅拌 8~10 min 后，将搅拌均匀的土样倒入土样箱中，并采用振动棒振捣 3~5 min，以排出土体中空气。调制后土样箱中土体高度为 450 mm，其基本物理指标如表 1 所示。

表 1 原状淤泥质黏土基本物理指标

Table 1 Basic physical indexes of undisturbed silt clay soil

含水率/%	相对密度	密度/(g·cm ⁻³)	干密度/(g·cm ⁻³)	孔隙比	液限/%	塑限/%	液性指数
60	2.74	1.58~1.65	0.98~1.01	1.72~1.80	55.6	27.8	27.8 > 1

(2) 调节土体上下表面气水条件

采用 0.5 mm 厚的塑料薄膜封闭土样箱中的土体上表面，并将电极插孔板盖于塑料薄膜之上。打开土样箱上的水阀，将土样箱底部的水槽与外接水箱联通，保持外接水箱的水位稳定在设定的地下水位高度，静置 48 h。

(3) 布置电极与连接电路

将铁质电极通过电极插孔板定位后，竖直插入土样箱中的土体中，将插入的铁质电极按正、负级进行分组，间隔排列，排间距 100 mm，如图 2 所示，并通过电缆线接入可调式稳压直流电源。

(4) 设定通电电源控制参数

通过可调式稳压直流电源，设定电流、电压输出范围和正负极倒向时间间隔。本次试验电流输出控制在 30~40 A，电压输出控制在 100 V，以保证较大的电流输出，正、负极倒向时间间隔为 15 min。

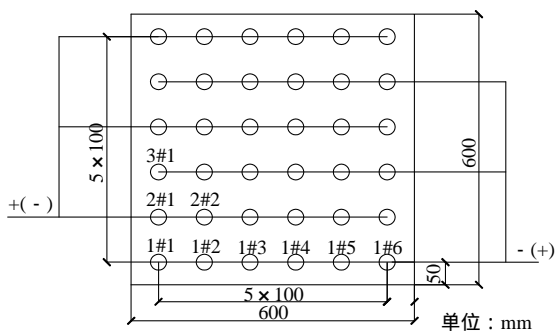


图 2 电极平面布置图

Fig.2 Plane layout of electrode

(5) 通电加固

检查线路连接正确后，启动电源，进行通电加固。通电过程中，可调式稳压直流电源会按设定的时间间隔自动倒向。试验过程中，记录可调式稳压直流电源上电流、电压仪表盘的读数。

(6) 停止通电：通电加固 15 ~ 25 d 后，随着电解金属离子与土体充分反映，土体总电阻会逐渐增大，电流会逐渐减小，当可调式稳压直流电源的输出电流读数稳定在 0 ~ 1 A 时，表明胶结成桩反应已经基本稳定，可停止通电，一般 20 d 左右的耗电量为 350 ~ 500 度。

4 室内模型试验结果与分析

4.1 电解过程与电解特性分析

通电加固初始阶段，正电极与土中水和氧气反应相当强烈，电极周围可观察到气泡和水渗出，而负电极处没有这种现象。但通过可调式稳压直流电源对正负极进行倒向后，原负极(倒向后的正极)马上可观察到气泡和水，这与电解反映仅在正极发生的认识是一致的。

通电 1 ~ 2 h 后，电极周围出现深色物质，可以观察到直径为 2 ~ 3 cm 的黑圈，同时表面水变为黄褐色，主要是电解生成的氧化物。随着电化学反应的不断进行，土体温度明显升高，并可看到蒸汽冒出，气味刺鼻，主要为有机质电解后释放的二氧化硫，硫化氢等气体。

部分电极在试验过程中出现断裂，其断裂部位基本相同，均位于绝缘段与未绝缘段的交界面上(即土表面以下 5 cm)，这主要是由于电极周围冒泡后形成一定的空洞，造成电极导电段与外界大气联通，而电极在这个土 - 水 - 气的分界面处腐蚀的速度明

显较封闭于土体内的导电段要快得多。

图 3 为 2 个正负极导向周期的电流对比图，从图中可以看出，单个循环周期内电流呈逐渐减小的趋势，这主要是由于电极周围氧化物沉积导致土体电阻的持续增大，输出电压已达最大值，输出电流逐步减小；正负极倒向时，电流发生突变，尔后逐渐减小，但反向电流强度明显较正向电流小，反映了正负电流的不均衡性，其原因来自于土体自身的不均匀性和正负电极电解的先后顺序，这是造成正电极和负电极周围土体胶结程度和胶结范围存在一定差异的主要原因。

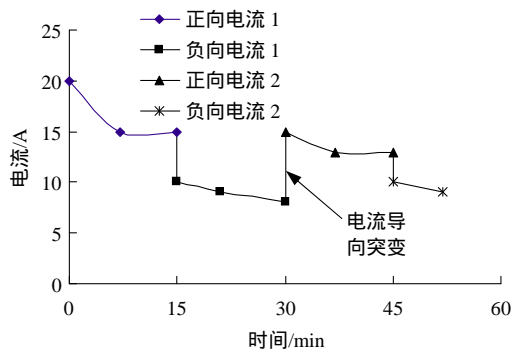


图 3 正负向电流对比图

Fig.3 Comparison diagram of positive-negative current reversal

整个通电过程中，日平均电流强度 - 时间曲线如图 4 所示，从图中可以看出，日平均电流强度随电化学反应的进行逐渐减小。通电 7 d 内，电流强度减小较快，尔后电流稳定在 1 ~ 2 A，表明土体电阻已很大，电解反应已很微弱，进一步通电加固的意义不大，可以停止试验。

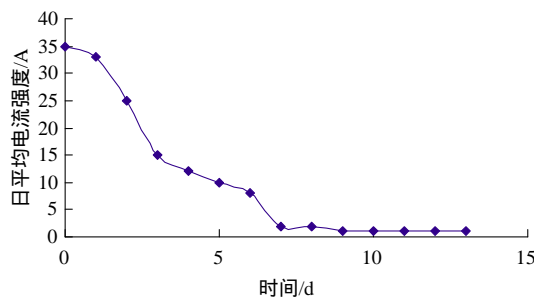


图 4 日平均电流强度 - 时间曲线

Fig.4 Daily average current variation curve with time

通电过程中，采用低频直流电阻测定器测定加固体电阻随时间的变化情况。图 5 给出了加固前、后两电极间电阻 - 电极间距关系曲线，从图中可以看出，加固前调制土样的电阻随间距的变化较小，基

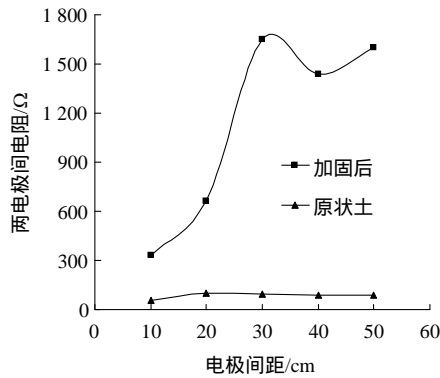


图 5 加固前、后两电极间电阻 – 电极间距关系曲线

Fig.5 Relation curve between resistance of two electrodes and their distance before and after reinforce

本为 50 ~ 60 Ω，而加固后电极之间电阻显著增大，100 mm 间距的土体电阻由 54 Ω 增大到 324 Ω，且电阻随电极间距的变大出现快速增长，间距超过 350 mm 后，电阻值基本稳定在 1 500 ~ 1 800 Ω。电阻的变化过程与电流的减小过程是吻合的。

采用土壤电导率测试仪测定了加固后不同平面位置处的土壤电导率和盐度(见表 2)。研究表 2 中数据发现，电化学胶结土电导率和盐度较桩间未胶结土小 20% ~ 25%，表明土体中的离子在电流的驱动下与电极电解的金属离子发生反应，所生成的胶结物含量越高，土体中参与反映的离子越多，其盐度就会相应减小，电阻会增大。这也说明了不同平面位置处的加固土体的物质组成上存在较大的差异。

表 2 土壤平面各位置盐度和电导率统计
Table 2 Salinity and conductivity of different areas

胶结土		桩间土	
盐度值/(g · L ⁻¹)	电导率 dS/m	盐度值/(g · L ⁻¹)	电导率 dS/m
0.582 0	2.685 0	0.716	3.359

4.2 电化学胶结桩结构特征及成桩效果分析

通电加固后，开挖发现大部分电极周围形成明显的圆柱形紧密胶结土层(见图 6, 7)，呈灰白色，结构紧密，质地坚硬，可定义为胶结核心层，其直径为 2.5 ~ 4.2 cm，平均直径为 2.84 cm，为电极直径(0.35 cm)的 8 ~ 10 倍。

胶结核心层外围可以观测到一红褐色圆圈，主要为电解形成的氧化物，质地较硬，手掰易碎，表明该范围内土体胶结作用较紧密胶结层明显要弱，

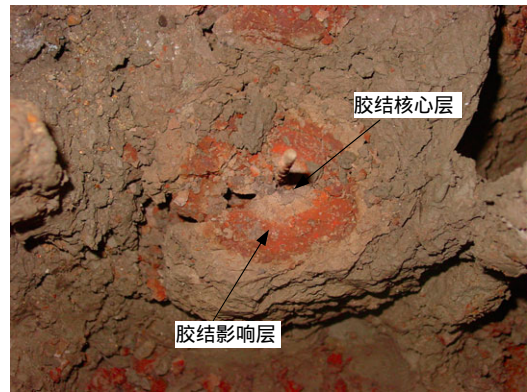


图 6 桩体结构组成

Fig.6 Composition structure of cement piles



图 7 电极周围形成的桩体

Fig.7 Cement piles around the electrode

可定义为胶结影响层，其直径在 4 ~ 7 cm 范围内，为电极直径的 12 ~ 18。胶结影响层以外土体仍呈灰褐色，软塑状，与加固前无明显的差异。

对加固后不同深度处胶结核心层、胶结影响层和未胶结土进行了含水量测定，测试结果表明，未胶结土含水量为 52% ~ 56%，与加固前土体的差异较小，表明在表面覆盖和稳定地下水位的条件下，电渗排水对整个土体的含水量影响较小；胶结核心层和胶结影响层的含水量分别为 42% 和 44% 左右，两者差异不大，表明含水量对胶结土体的影响较小，胶结核心层在含水量较高的情况(大于 40%)下，仍具有较好结构性和较高的强度。

为了检验电极周围形成的胶结物的水稳定性，进行胶结物的崩解试验。在桩体上取 2 块胶结土，分别泡入纯水中，浸泡 1 个月后尚未见溶解、崩解和泥化等现象，仍保持原有的几何形状，试样质量变化微小，如表 3 所示，表明胶结作用显著，胶结土的水稳性好。

表 3 胶结物浸泡过程中质量变化

Table 3 Cement compounds quality change in the soaking process

浸泡时间/h	质量/g	
	1#胶结土	2#胶结土
1	72.23	59.40
48	71.55	59.20
240	72.11	60.70
480	71.80	60.68
360	71.82	60.95

4.3 电化学桩加固土体的强度分布规律

为了分析电化学加固土体的强度分布规律，采用微型贯入仪对不同深度平面进行了试验，其结果见表 4。从表 4 中可以看出，加固前软土样含水量较高，微贯入强度小于 10 kPa，加固后，距电极 1~2 cm 范围内的胶结层核心层强度很高，其测试值已超过微型贯入仪的最大量程 500 kPa。而胶结影响层的平均强度为 66.5 kPa，与胶结核心层相差一个数量级，表明胶结核心层与胶结影响之间存在一个明显的强度突变界面；但胶结影响层的土体强度仍较桩间未胶结土(距电极 5 cm 处)的强度要高，且同性电极中点处平均强度(20.8 kPa)较异性电极中点强度(16.4 kPa)要高，单位加固区域(即 10 cm×10 cm)中心点的测试平均强度为 19.5 kPa。

表 4 平面各位置微型贯入值

Table 4 Micro-penetration test of different locations of plane

深度/mm	贯入值/kPa					单位加固区域中心点
	加固前土体	胶结核心层(距电极 1~2 cm)	胶结影响层(距电极 2 cm)	同性电极中点(距电极 5 cm)	异性电极中点(距电极 5 cm)	
70	< 10	> 500	63.5	25.0	16.8	23.8
140	< 10	> 500	63.5	20.8	14.3	25.0
250	< 10	> 500	70.0	17.5	15.8	15.0
330	< 10	> 500	69.0	20.0	18.8	14.3
平均值	< 10	> 500	66.5	20.8	16.4	19.5

可见，加固后胶结核心层的强度很高，桩周土体强度随与电极的距离的增大而逐渐减小，且在胶结核心层与影响层之间存在一明显的强度突变面，胶结影响层(红褐色区域)的土体强度较桩周末胶结土要高 50%左右，最终形成桩-土复合地基，整体强度较加固前(5 kPa)显著提高，加固效果明显。

4.4 电化学桩加固土体的承载力特性

为了探讨电化学加固后所形成的桩-土复合地基的承载力特性，采用自行研制的一套室内平板载荷试验装置，对加固前、加固后土体分别进行了静载荷试验。载荷板尺寸为 20 cm×20 cm，采用沉降相对稳定法进行分级加载，由于加固前的调制土样为流塑状的软土，试验时采用添加金刚砂的方式来实现小的荷载增量，加固后的桩-土复合地基采用油压千斤顶和反力架来实现加载过程，承载板下压 4 根胶结桩。

图 8 为加固前、后荷载-沉降曲线，从图中可以看到，加固前后土体的载荷-沉降曲线均呈双曲线型，按相对变形法计算地基承载力，即取沉降量 s 与承载板宽度 b 的比值 $s/b = 0.02$ 对应的荷载为地基承载力基本值，同时利用荷载-沉降曲线初始直线段，按均质各向同性半无限弹性介质，计算变形模量：

$$E_0 = W(1 - \mu^2) \frac{pd}{s} \quad (5)$$

式中： W 为承压板形状系数，对方形板取 0.88； E_0 为土的变形模量(MPa)； μ 为土的泊松比，取 0.35； p 为承压板上的总荷载(kPa)； d 为承压板的宽度，取 0.2 m； s 为与荷载 p 相应的变形量(mm)。

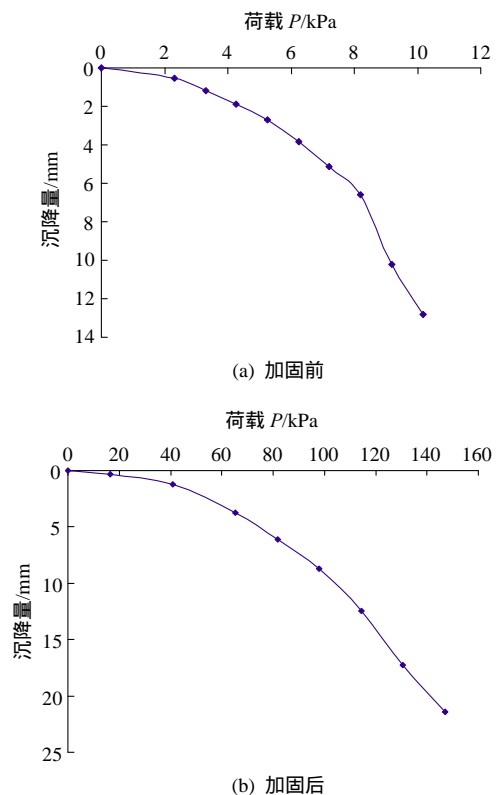


图 8 载荷-沉降曲线

Fig.8 Static load-settlement curve

经计算,加固前的调制土的承载力为 6.36 kPa,变形模量 $E_0 = 0.245$ MPa。加固后胶结桩-土复合地基的承载力为 68.2 kPa,变形模量为 $E_0 = 2.63$ MPa,可见经过电化学加固以后,土的承载力和变形模量都显著增大,基本上是加固前土体的 10 倍。结合胶结桩-土复合地基组成结构及强度分布规律来看,复合地基由胶结核心层、胶结影响层和未胶结桩间土构成,核心层的强度和承载力较高,但所占面积小,而未胶结的桩周土承载力低,所占面积大,整体平均承载能力基本上与胶结影响层的强度等级(68.2 kPa)相当。

另外,模型试验中的胶结桩桩端没有稳定土层的支撑,类似于摩擦桩,没有充分发挥桩体对承载能力的贡献。因此,胶结桩-土复合地基的承载能力还有进一步提高的空间。

这里讨论的承载力的提高应该说主要还是来自于电化学胶结桩,电渗排水的影响相对很小。而实际工程中,桩端一般布置于稳定的土层,且可以利用电渗效应,在形成胶结桩的同时,采用集并排水的方式对桩周土进行排水固结,胶结桩-土复合地基的实际承载能力将比模型试验结果要高得多。

5 结 论

(1) 研制了一套软土电化学胶结成桩加固的室内模型试验装置,较好地模拟现场工程条件下铁质胶结成桩加固的物理化学过程。

(2) 给出了电化学成桩加固的模型试验方法及控制参数,尽量减小电渗排水固结的影响,而突出成桩效应对地基承载力的贡献。

(3) 揭示了电化学胶结成桩过程中电流、电阻及含水率的变化规律,为试验控制参数的优化提供了有力的参考。

(4) 弄清了胶结桩体的组成结构及其基本物理特征,统计分析了胶结土体范围与电极直径的相关关系。

(5) 揭示电化学胶结桩-土复合地基的强度分布规律及地基承载力特性,为实际工程中软土电化学加固后地基承载力评价提供了有力的参考依据。

参考文献(References):

- [1] 冯晓腊,严应征,李玉花. 电化学成桩法加固软土地基的应用研究[J]. 土工基础,2003,17(1):1-4.(FENG Xiaola,YAN Yingzheng,LI Yuhua. Application and research of electrochemistry pile-making method in soft foundation improvement[J]. Soil Engineering and Foundation,2003,17(1):1-4.(in Chinese))
- [2] 余 飞,陈善雄,程昌炳,等. 萧山跨湖桥独木舟遗址区的电化学桩加固试验[J]. 土工基础,2010,24(2):10-13.(YU Fei,CHEN Shanxiong,CHENG Changbing,et al. Field experiment study on electrochemical stabilization of soft soil in Xiaoshan canoe archaeological site[J]. Soil Engineering and Foundation,2010,24(2):10-13.(in Chinese))
- [3] 王小刚. 软土电化学成桩加固法模型试验[硕士学位论文][D]. 武汉:中国科学院武汉岩土力学研究所,2010.(WANG Xiaogang. Laboratory model test on electrochemical stabilization in soft soil[M. S. Thesis][D]. Wuhan:Institute of Rock and Soil Mechanics,Chinese Academy of Sciences,2010.(in Chinese))
- [4] 曾国熙,高有潮. 软黏土的电化学加固(初步试验结果)[J]. 浙江大学学报:工学版,1956,1(2):12-35.(ZENG Guoxi,GAO Youchao. Electrochemical stabilization in soft soil(preliminary test result)[J]. Journal of Zhejiang University:Engineering Science,1956,1(2):12-35.(in Chinese))
- [5] SHANG J Q,MOHAMEDHASSAN E,ISMAIL M. Electrochemical cementation of offshore calcareous soil[J]. Canadian Geotechnical Journal,2004,41(4):877-893.
- [6] DZHAIANI L G. Prospects for application of the method of electrochemical soil stabilization in the construction of the Tobolsk oil-chemical combine[C]// Proceedings of the Ninth All-Union Scientific-technical Conference. Moscow:[s.n.],1978:103-105.
- [7] ZHINKIN G N. Electrochemical stabilization of soils in the construction industry[Ph. D. Thesis][D]. Stroizdat,Leningrad:[s.n.],1966.
- [8] ZAITSEVA L G. Intensification of electrochemical stabilization of clayey soils in bases of structures[Ph. D. Thesis][D]. Moscow:Candidate of Technical Sciences,1973.
- [9] 程昌炳,刘少军,王远发,等. 胶结土的凝聚力的微观研究[J]. 岩石力学与工程学报,1999,18(3):322-326.(CHENG Changbing,LIU Shaojun,WANG Yuanfa,et al. Microscopic study on cohesion of a cemented soil[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,1999,18(3):322-326.(in Chinese))